

# 初期異方応力が地震応答に与える影響に関する研究

東北学院大学 学生会員 増成 貴弘, 正会員 吉田望

## 1 はじめに

1995年兵庫県南部地震を契機として性能照査型設計の必要性が指摘され<sup>1)</sup>, 設計指針に反映されるようになってきた。このために, 地盤や土構造物においては, 変位を予測することが重要となった。このため, 有限要素法を用いた変位の予測も通常の設計で行われるようになってきた。

これまでの地震応答解析で多く用いられてきたのはSHAKE<sup>2)</sup>や FLUSH<sup>3)</sup>といった等価線形化法による解析である。地震時の挙動の予測という観点における等価線形化法の欠点はいくつか挙げられている(例えば, 文献<sup>4)</sup>)。ここで, 変位の予測という観点で見ると, これ以外に次の二つの欠点を挙げる事ができる。まず, 等価線形化法では線形挙動を仮定しているために残留変位が発生しない。次に, 初期応力の影響が考慮されない。すなわち, 地盤は通常  $K_0$  応力状態にあり, これは初期せん断応力が作用しているが, これが考慮されていない。

二つ目の欠点は, 等価線形化法のみではなく, 逐次積分に基づく非線形法でも発生する。初期応力を求めるために自重解析を行うと, 初期せん断のため初期剛性が小さくなって, 現実に合わない。また, 初期応力の値を求めるのはしばしば困難である。そこで, 初期応力を有効上載圧で等方に設定する解析がしばしば行われてきた。これは等価線形化法と同じ解析条件でもある。

これらを踏まえ, 本研究では, 初期せん断の考慮の有無により, どの程度の差があるかをケーススタディにより検討する。

## 2 モデル地盤

1993年釧路沖地震で実際に被害が生じた北海道標茶町茅沼地区シラルトロエトロの宅地造成地<sup>5)</sup>をモデルとする。これは, 造成地では過去の地震履歴などの影響を受けていないので, 初期応力状態は自重解析で得られるものとそれほど変わらないと考えたためである。図1に単純化したモデル図に示す<sup>5)</sup>。ここで, 1が盛土, 2が地山である。なお, 本研究では実際の被害を明らかにすることが目的ではなく, 初期応力の違いが解析結果に与える影響を明らかにすることが目的であることから, 材料特性は表1に示すように非常に

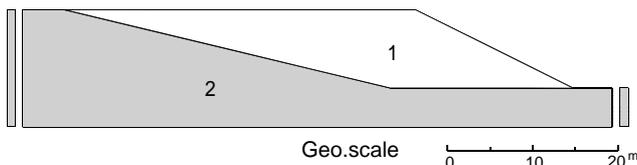


図1 モデル図

単純化する。ここで,  $\gamma_i$  は単位体積重量,  $V_s$  はせん断波速度,  $c$  は粘着力である。なお, 材料を  $c$  材としたのは非線形性の評価を単純にするためである。

表1 材料特性

材料	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
盛土	18	100	80	0.25
地山	19	200	150	0.25

## 3 解析方法

解析では, 二次元汎用プログラム STADAS<sup>6)</sup>を用いた。初期応力状態は弾性の自重解析により求めた。この際, 弾性定数は表1に示される値より求めた。ここで, 初期せん断の影響を検討するために, 二つのケースの解析を行うことにした。一つは, 自重解析で得られた応力を用いたケース(以下, 異方応力状態), もう一つはこのうち鉛直方向の直応力 $\sigma_v$ を用い,  $\sigma_h = \sigma_v$ ,  $\tau_{vh} = 0$ と設定したケース(以下, 等方応力状態)である。後者は, 初期せん断の影響を考慮しないケースに相当し, 実務でもよく行われる方法である。

非線形性は文献<sup>7)</sup>に示される手法で, 双曲線モデルを用いて考慮した。解析に際し, 剛性比例減衰を考慮した ( $\beta = 0.005$ )。数値積分は Newmark の $\beta$ 法 ( $\beta = 0.25$ )により行った。

入力地震波は, 1993年釧路沖地震の際に, 電力中央研究所が厚岸で記録した地震波の N-S 成分の主要動部 30秒(図2)を用いた。

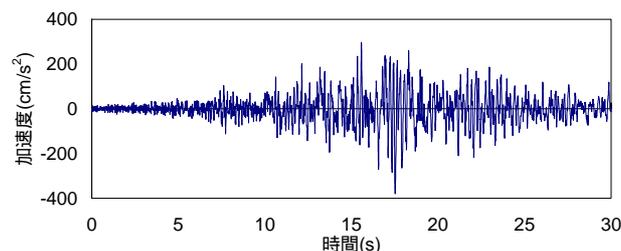


図2 入力地震波

## 4 解析結果と考察

等方応力状態と異方応力状態の解析終了時の変位を図3, 図4に示す。これ以後は地震入力は小さいので, これはほぼ残留変形と考えて良い。等方応力状態と異方応力状態とでは, 前者が上流側に変位し, 後者では下流方向に変位するという全く逆の挙動をしている。これは, 等方応力状態では盛土が傾斜しているという条件

が考慮されないこと、図の左向けの入力が大きかったことなどが原因と考えられる。一方、異方応力状態では下流方向への流れが起きている。すなわち、盛土の変形を考える上では初期応力状態を適切に評価することが重要であることがわかる。

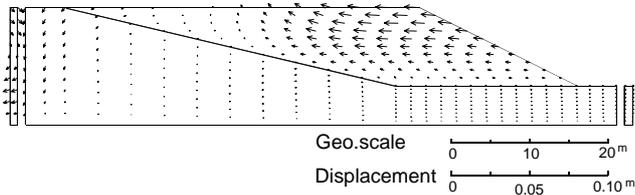


図3 解析終了時の変位(等方応力状態)

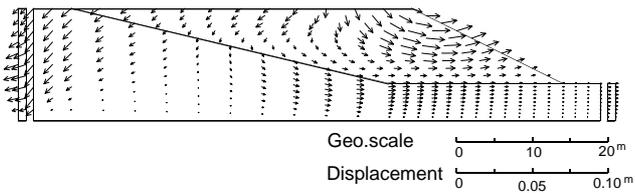


図4 解析終了時の変位(異方応力状態)

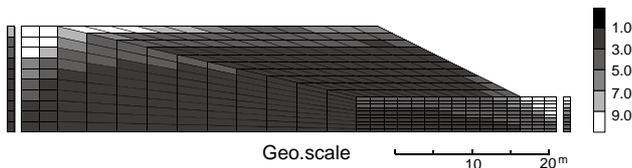


図5 等方応力状態 安全率

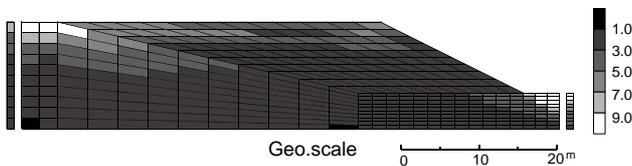


図6 異方応力状態 安全率

次に、最大安全率を図5、図6に示す。ここで、安全率はモールの応力円の中心からモール・クーロンの破壊線までの最短距離をモールの応力円の半径で除した値として定義される。ここで、各要素の $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ はそれぞれの最大値を用いている。

安全率にはあまり差が生じていないように見える。そこで盛土地盤の代表的な要素の応力 $\tau_{xy}$  ひずみ $\gamma_{xy}$ 関係を図7に、初期と半径が最大を示したときモールの応力円を図8に示す。応力 ひずみ関係をみると初期異方応力状態のひずみがマイナスの方向に収束している。ここで、応力とひずみは圧縮を正にしているので、ひずみの負方向は下流方向に変位していることに相当する。また、最大応力に対応するモールの応力円では半径はほとんど変わらない。ここでは、 $c$ 材として安全率を計算しているため、差が出ていないが $\phi$ 材であれば、安全率にも大きな差が現れることが容易に想像できる。なお、最大せん断応力に大きな差がないのは、応力は力のつり合いで決まるのが原因と考えられる。ただし、詳細にみると、異方応力状態では剛性が低いため最大値の発現に時間がかかり、その間に

除荷が発生するため、等方応力状態に比べやや小さめである。

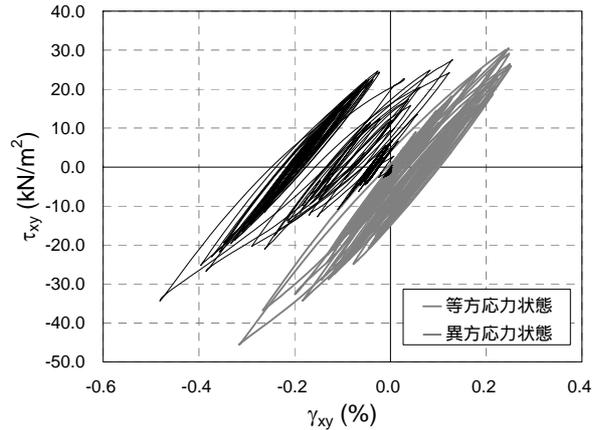


図7 応力 ひずみ関係

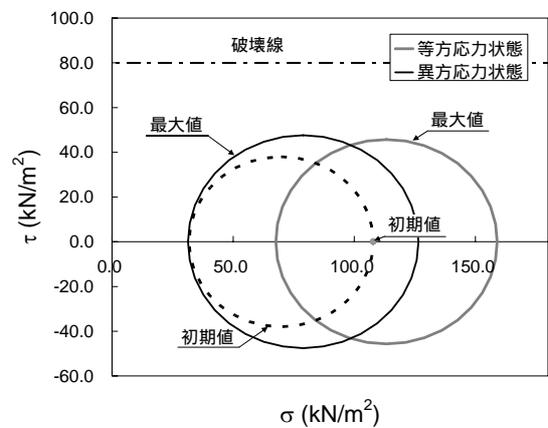


図8 モールの応力円

## 5 まとめ

初期応力の違いによる地震応答解析の結果の違いをケーススタディにより検討した。適切な変位の評価のためには初期応力状態を適切に設定することが重要であることがわかった。

### 参考文献

- 1) 土木学会 (1996) : 土木学会耐震基準等に関する提言集
- 2) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
- 3) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H. B. (1975): FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley
- 4) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 5) 三浦均也, 吉田望, 鷲尾朝昭, 西村右敏 (1994) : 1993年釧路沖地震による造成地被害に関する解析的検討, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 763-768
- 6) Yoshida, N. (1993): STADAS, A computer program for static and dynamic analysis of ground and soil-structure interaction problems, Report, Soil Dynamics Group, The University of British Columbia, Vancouver, Canada
- 7) 吉田望, 辻野修一 (1993) : 多次元解析に用いる簡易な構成則, 第28回土質工学研究発表会平成5年度発表講演集, pp. 1221-1224